ارزیابی جانمایی مناسب پنل‌های فتوولتائیک بر روی نمای مناطق شهری به‌منظور ارتقاء بهره‌وری و کارایی

تاریخ دریافت مقاله : ۹۹/۰۴/۱۵ تاریخ پذیرش نهایی مقاله : ۹۹ /۰۷/۰۱

فاطمه یارمحمد (دکتری معماری، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران)
فاطمه مهدیزاده سراج*(دکتری معماری، استاد تمام دانشگاه علم و صنعت، دانشکده معماری و شهرسازی، گروه معماری، تهران، ایران)
سید علی نوری (دکتری معماری، استادیار دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال،گروه معماری، تهران، ایران)

چکیده

با توجه به بحران کمبود منابع انرژی و آلودگی‌های زیست‌محیطی، نیاز به استفاده از انرژی‌های جایگزین و تجدیدپذیر ضروری می‌باشد. این مهم منجر به گرایش روزافزون استفاده از سیستم‌های خورشیدی، از مهم‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر شده است. پنل‌های فتوولتاییک از جمله اصلی‌ترین و پرکاربردترین سیستم‌های فعال خورشیدی است که با توجه به محدود بودن فضای بام ساختمان‌ها جهت نصب، تلفیق آن با نمای ساختمان‌های شهری مورد توجه قرارگرفته است. در این مقاله ضمن بررسی عوامل تأثیرگذار بر بازدهی پنل‌هایBIPV[1] به بررسی تأثیر تلفیق پنل‌های فتوولتاییک با اجزای اصلی نما شامل جداره‌های شیشه‌ای بنا، نمای ساختمان و سایبان‌ها بر میزان بهره‌وری انرژی و مقایسه آن پرداخته شده است. جهت رسیدن به این هدف، یک ساختمان اداری در نرم‌افزارگرس هاپر شبیه‌سازی و با استفاده از پلاگین‌های هانی‌بی و لیدی‌باگ، پنل‌های فتوولتاییک در اجزای مختلف نمای جنوبی پیاده‌سازی و میزان بهره‌وری انرژی در هر یک از اجزا بررسی شد. همچنین سایر عوامل تأثیرگذار بر موقعیت نصب پنلها و میزان اثرگذاری آن شامل جانمایی، نوع، بازدهی، ضریب عبور نور، شفافیت و تنوع طرح، پوشش برف و باران، میزان هزینه و موجودی بازار بررسی و با استفاده از آنتروپی‌شانون وزن‌دهی و رتبه‌بندی شد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد تلفیق پنل‌ها با مساحت یکسان به ترتیب با سایبان، بدنه اصلی نما و جدار شیشه‌ای بیشترین تأثیر را در بهره‌وری و کارایی انرژی دارد.

واژه‌های کلیدی: پنل‌های فتوولتاییک، نمای ساختمان، سایبان، جانمایی و بهره‌وری انرژی.

* نویسنده رابط: fateme.yarmohamad@gmail.com

[1] Building Integrated Photovoltaic

۱- مقدمه

رشد روزافزون مصرف انرژی از یک‌سو و محدودیت منابع انرژی از سوی دیگر به یکی از بحران‌های جدی جوامع منجر شده است. رشد شتابان شهرنشینی و افزایش بی‌رویه ساخت‌وسازهای شهری، موجب افزایش مصرف انرژی به‌ویژه درکلانشهرها شده است. تأمین انرژی اولیه جهت ساخت و انرژی مصرفی، ساختمان‌ها را به مصرف‌کننده‌های اصلی انرژی مبدل ساخته به‌گونه‌ای که حدود ۴۰ درصد از مصرف انرژی در ساختمان‌ها صورت می‌گیرد. همچنین مصرف انرژی‌های فسیلی و انرژی‌های تجدیدناپذیر از عوامل اصلی تولید دی‌اکسیدکربن و در پی آن آلودگی محیط‌زیست می‌باشد(Nasrollahi, 1390). به‌همین خاطر رویکرد استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در سال‌های اخیر به شدت فراگیر و توسعه یافته است. از مهم‌ترین انواع انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی خورشید می‌باشد. انرژی ناشی از سه روز تابش خورشید به زمین، برابر با تمام انرژی ناشی از احتراق کل سوخت‌های فسیلی در دل زمین است. بنابراین، بر اثر تابش خورشید به مدت چهل روز، می‌توان انرژی مورد نیاز یک قرن را ذخیره کرد. کشور ایران به دلیل قرار داشتن بر کمربند تابش خورشیدی از قابلیت خوبی در این زمینه برخوردار است. در ۹۰ درصد خاک ایران، بیش از ۳۰۰ روز آفتابی وجود دارد که میزان تابش خورشیدی حدود ۱۸۰۰ تا ۲۲۰۰ کیلووات ساعت بر مترمربع است. با این وجود بررسی‌های آماری حاکی از آن است که تاکنون کمتر از ۰,۲ درصد از ظرفیت‌ها در حوزه انرژی خورشیدی بهره‌برداری شده است و متاسفانه پیشرفت چشمگیری در این حوزه وجود نداشته است. تحقیقات نشان می‌دهند که به رغم رشد ۳ درصدی اقتصاد جهانی و تقاضای فزاینده برای مصرف انرژی، انتشار دی‌اکسیدکربن حاصل از سوخت‌های فسیلی و صنعت ثابت مانده است (REN21، 2017). این امر عمدتاً به دلیل کاهش مصرف زغال سنگ و رشد ظرفیت انرژی تجدیدپذیر و پیشرفت در کارایی انرژی می‌باشد. تولید برق توسط فناوری فتوولتائیک با متوسط نرخ سالانه ۶,۸٪، سریع‌ترین منبع انرژی درحال رشد برای تجدیدپذیرهاست و به گزارش آژانس بین‌المللی انرژی، روند فناوری‌های خورشیدی نشان می‌دهد که سیستم‌های فتوولتائیک می‌توانند تا سال ۲۰۵۰ م.، ۱۶٪ از برق جهان را تولید کنند و سهم آنها در کاهش انتشار گاز CO_2 نیز تا ۲۰٪ خواهد بود.(IEA, 2014) عمده تبادلات انرژی در ساختمان وابسته یا حداقل مرتبط با پوستهٔ خارجی بناست. پوستهٔ خارجی محل تبادل حرارت بنا با محیط اطراف، جذب انرژی‌های خورشیدی، تهویه، و نفوذ نور و صدا به محیط داخلی است که با افزایش نسبت سطح نما به قاعدهٔ بنا افزایش می‌یابد. پوسته و نمای خارجی بنا محل مناسبی جهت استفاده از ظرفیت‌های خورشیدی توسط سیستم‌های خورشیدی می‌باشد. یکی از مؤثرترین سیستم‌های خورشیدی در جهت کاهش

مصرف سوخت‌های فسیلی و آلاینده‌های اصلی هوا، سیستم‌های فتوولتاییک می‌باشند. سیستم‌های فتولتاییک انرژی خورشیدی را به برق تبدیل کرده و قادر به تأمین برق مورد نیاز ساختمان می‌باشند. در حال حاضر این سیستم‌ها عمدتاً بر روی بام بناها اجرا می‌شود اما با توجه به وسعت این سیستم‌ها و اشغال فضای وسیع از بنا، ضرورت نصب آن بر نمای ساختمان‌ها از جمله ساختمان‌های بلندمرتبه و چگونگی انطباق آن با نمای ساختمان در جهت افزایش کارآیی و بهره‌وری این سیستم‌ها در تولید انرژی پاک ضروری به نظر می‌رسد. از روش‌های انطباق سیستم‌های فتوولتاییک با نمای ساختمان‌ها، تلفیق پنل‌های فتوولتاییک با متریال نما، سایبان‌ها و شیشه پنجره‌ها می‌باشد. هدف از این تحقیق، بررسی میزان بهره‌وری انرژی پنل‌های فتوولتاییک در تلفیق با هر یک از عناصر ذکر شده در نمای ساختمان می‌باشد.

۱-۱- فتوولتائیک‌های ترکیبی با ساختمان(BIPV)

ماژول‌های فتوولتائیک قادرند تا نور خورشید، به منزله بزرگترین منبع انرژی روی زمین، را بدون استفاده از تجهیزات مازاد، به الکتریسیته تبدیل کنند. سلول‌های فتوولتائیک از نیمه‌هادی‌های مختلف شامل مواد رسانای الکتریکی ساخته شده‌اند.(Soteris et al., 2009) ادغام این سلولهای فتوولتائیک با ساختمان، در مرحله طراحی ساختمان، جزء کارکردهای سازه ساختمان محسوب شده و در ساختار بنا پیش‌بینی می‌گردد. این دسته شامل طرح‌هایی است که جایگزین متریال‌های رایج بام مانند انواع تایل‌ها و پوشش‌های فلزی سقف شیروانی و شینگل می‌شود. ماژول‌هایBIPV همچنین می‌توانند خود عناصر معماری باشند که ظاهر ساختمان را تقویت کرده و جلوه‌های بصری بسیار مطلوبی را ایجاد می‌کنند. این نوع آرایه‌ها شامل اندازه‌ها و شکل‌های ماژول سفارشی با فضاهای مات یا شفاف بین سلول‌ها هستند و می‌توان از آنها برای دیوارهای شیشه‌ای، سایبان‌ها، پنجره‌های دیواری و سقفی استفاده کرد (Barkaszi، 2001؛ Crawford et al.، 2006). بنابراین سیستم‌هایBIPV، محصولات خورشیدی چندمنظوره‌ای هستند که هم نقش مصالح ساختمانی را داشته و هم برق تولید می‌کنند (Peng et al., 2011). در بخش ساختمان، حرکت سریع به سمت قطعات پیش‌ساخته ساختمانی، باعث تغییرات عمده‌ای در به کارگیری سامانه‌های فتوولتائیک تلفیقی می شود. با آن‌که پیش‌ساخته بودن باعث کاهش تنوع در گزینه‌های طراحی می‌شود در عین حال منجر به کاهش هزینه و بالا بردن کیفیت نصب نیز می‌گردد. از آنجایی که در سامانه‌های تلفیقی، سامانه فتوولتائیک علاوه بر تولید انرژی وظیفه محافظت و زیبایی نما را نیز بر عهده دارد، چند عملکردی بوده و در مقایسه با سامانه‌های مستقل که احتیاج به سازه کمکی دارند در هزینه‌ها صرفه‌جویی می‌کند. به علاوه

بیشتر انرژی تولید شده مستقیماً استفاده شده و نیاز به انتقال به مکان دیگر ندارد. سامانه فتوولتائیک تلفیقی می‌تواند جایگزین سقف‌ها، نماها، دیوارهای‌کرکره‌ای، شیشه یا عناصر ویژه‌ای مانند سایبان‌ها یا آفتاب‌شکن‌ها شود(vafaei,2012). پنل‌های فتوولتائیک که متشکل از سلول‌های خورشیدی می‌باشند به عنوان جزئی از پوسته خارجی ساختمان در ساختمان‌هایBIPV و جایگزین مصالح نما و بام، در طراحی معماری بنا لحاظ شده و به گونه‌ای با ساختمان ترکیب می‌شوند که علاوه بر یکپارچگی با نما مزایای بسیاری مانند عدم اشغال فضای اضافی، تولید برق رایگان، کاهش مصرف انرژی و عدم تولید آلودگی، سایه‌اندازی و محافظت از بنا در مقابل آفتاب ناخواسته، عایق حرارتی و صوتی، ساختار و جزئیات ساختمان و جلوه معمارانه و کاهش بار سرمایشی ساختمان را دارند(vafaei 2016).

۲- پیشینه تحقیق

۲-۱-پنل‌های فتوولتاییک در تلفیق با نما

اغلب در بناهای با طبقات کمتر اجرای سیستم‌های فتوولتاییک به عنوان بخشی از بام توصیه می‌شود اما طبیعی است که با افزایش تعداد طبقات و ارتفاع ساختمان، نسبت سطح نما به سطح بام افزایش یافته و در نتیجه نصب در نما گزینه مناسبی خواهد بود، بدین‌معنی که برای طراحی سیستم‌های فتوولتائیک در مراکز شهری با تراکم بالا، نمایBIPV از ارزش بالاتری برخوردار است، علاوه بر این امروزه با توجه به میزان دسترسی بالا به سلول‌های فتوولتائیک فیلم نازک، یکپارچه‌سازی با نما بیشتر مورد استقبال قرار می‌گیرد.

معمولاً برای نماهای فتوولتائیک یکپارچه از پنل‌های فتوولتائیک عمودی در جبهه دیوار جنوبی استفاده می‌شود ولی میزان خروجی برق تولیدی از پنل‌های عمودی در مقایسه با پنل‌های شیبدار رو به خورشید کمتر است و میزان این خروجی در شرایطی که زاویه تابش پرتوهای خورشید به خط عمود نزدیکتر است به کمترین میزان خود خواهد رسید. (Wolter 2003) همچنین در گذشته پوشاندن سقف یا دیوار جنوبی با پنل‌ها خیلی اقتصادی به نظر نمی‌رسید، اما با ارزانتر شدن پنل‌ها پوشاندن نماهای شرقی و غربی نیز مفید خواهد بود چرا که این نماها می‌توانند ۶۰ درصد انرژی تولید شده در نمای جنوب را تولید نمایند. اگر از المان‌های عمودی مانند لوورها روی نما استفاده شوند، باید با کاهش ابعاد و ضخامت تاحد ممکن از ایجاد سایه روی سلول‌های فتوولتائیک جلوگیری شود (Jafari, 2015). باید در نظر داشت که مانند بام، پشت این سلول‌ها نیز فضای تنفس برای خنک شدن وجود داشته باشد (Ghiabaklou, 2010).

۲-۲-پنل‌های فتوولتاییک در تلفیق با سایبان

سایبان‌های فتوولتائیک را می‌توان به صورت افقی و یا شیبدار روی دیوار قائم نما قرار داد. هنگامی‌که از سیستم‌های فتوولتائیک به عنوان سایبان استفاده می‌شود، تأثیر سایه سایر پنل‌های فتوولتائیک را باید در نظر گرفت. سایبان‌های فتوولتائیک علاوه بر اینکه مانع ورود گرما به داخل ساختمان می‌شوند، بار دستگاه‌های سرماساز را کاهش می‌دهند (Wolter, 2003).

۲-۳-پنل‌های فتوولتاییک در تلفیق با جداره‌های شفاف یا شیشه‌ای

به طور کلی دو روش برای فتوولتائیک‌ها در ارتباط با شیشه وجود دارد که عبارتند از: ۱- نیمه شفاف‌ها که شبیه شیشه‌های نیمه شفاف یا شیشه‌های انعکاسی است ۲- صفحات مات با فواصلی بین آن که نور می‌تواند از آن‌ها عبور کند اما با هریک از دو روش کار مذکور با فتوولتائیک و شیشه، میزان نور عبوری که از میان پانل‌ها وارد فضا می‌شود قابل تنظیم است. نصب فتوولتائیک‌ها به جای شیشه عموماً در نقاطی مناسب است که احتیاجی به ورود نور نبوده و یا از نظر دید و منظر مشکلی ایجاد نمی‌نماید(Ghiabaklou, 2010). اگرچه نیاز به تأمین روشنایی از طریق پوسته ساختمانBIPV، موجب تغییر و پیشرفت در این فناوری شده و امروزه پنل‌های فتوولتائیکی وجود دارند که همانند پنجره‌ها می‌توانند کارکرد شفافیت را برای تأمین نور طبیعی نیز داشته باشند. در نهایتBIPV به ساختمانی اطلاق می‌شود که معمار یا طراح در فرآیند طراحی ساختمان، فتوولتائیک را جزئی از بنا در نظر گرفته که در ایده و فرم بنا و حتی جهت آن تأثیر می‌گذارد.

۲-۴-عوامل مؤثر بر بازدهی پنل‌های فتوولتاییک

تلاش در جهت جایگزینی انرژی‌های تجدیدپذیر و استفاده از پتانسیل انرژی خورشید، به منظور افزایش بازدهی پنل‌های فتوولتاییک و استفاده از حداکثر ظرفیت این سیستم‌ها به شدت فراگیر شده است. گزارش کشورهای مختلف به IEA[1] نشان می‌دهد که بخشی از تمرکز بخش تحقیق و توسعه (R&D[2]) آنها روی کاربردهایBIPV و بخش دیگر بر روی فناوری سلول‌ها و افزایش میزان بازدهی آنهاست. یکی از اهداف اصلی بازار آینده ساخت و ساز ساختمان و چشم‌انداز کلی ساختمان‌سازی جدید، پیشروی به سمت افزایش بهره‌وری انرژی می‌باشد(Romano et al., 2016). این رویکرد در بهبود راندمان انرژی نه تنها در کاربردهای BIPVدر ساختمان بلکه در کلیه اجزای سازنده ساختمان مورد نیاز است (Gallo, 2014).

[1] International Energy Agency
[2] Research and Development Department

تلاش در جهت افزایش بازدهی و بهره‌وری انرژی پنل‌های فتوولتاییک، منجر به انجام تحقیقات متعدد بر روی شناسایی عوامل مؤثر بر میزان بازدهی این پنل‌ها شده است. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد، خروجی تولید شده توسط پنل فتوولتائیک به طور مستقیم به تابش خورشیدی جذب شده توسط آن، پارامترهای محیطی و اقلیمی علاوه بر پارامترهای تبدیل انرژی در داخل پنل‌ها وابسته است(Jordan et al., 2013). خروجی و بازدهی پنل‌های فتوولتائیک نه تنها به بازدهی تبدیل انرژی متریال آن بلکه به میزان تابش، دما، رطوبت، گرد و غبار انباشته شده و سرعت باد در اطراف پنل‌ها نیز بستگی دارد(Singh, 2013). راندمان تبدیل فتوولتائیک با افزایش دمای عملکرد آن کاهش می‌یابد. این افزایش دما به متریال پنل‌ها نیز وابسته بوده به‌عنوان مثال افزایش دمای سلول‌های خورشیدی سیلیکون کریستالی نسبت به فیلم‌های نازک سیلیکونی آمورفوس بیشتر می‌باشد. همچنین تهویه مناسب در پشت ماژول‌ها می‌تواند راندمان تبدیل انرژی پنل‌ها را افزایش دهد(Papadopoulou, 2012). سیستم‌های خورشیدی مانند سیستم‌های دیگر نیاز به کار با حداکثر عملکرد ممکن را دارند، این با طراحی، ساخت، نصب و جهت‌گیری مناسب پنل‌ها امکان پذیر می‌شود(Safdarian et al., 2015). جهت‌گیری (زاویه آزیموت سطح) و زاویه شیب پنل هردو بر تابش خورشیدی که به سطح جمع کننده می‌رسد تأثیر می‌گذارند.(Skeiker, 2009) در تحقیق صورت گرفته توسط Yunyun و همکاران(2017) تأثیرات ناشی از ضخامت لایه هوا، جهت‌گیری سیستم BIPV، ارتفاع خورشیدی و آزیموت خورشیدی بررسی شده است. ارزیابی عملکرد سالانه سیستم BIPV نشان می‌دهد که سایه قاب باعث کاهش راندمان سیستم فتوولتائیک به ۲,۶٪ راندمان عادی (۱۳,۰٪) می‌شود. سایه پوشش-دهنده بر روی سلول‌های خورشیدی تأثیر منفی بر ولتاژ خروجی آن دارد، اگرچه میزان کاهش خروجی پنل‌ها به تعداد و ترکیب سلول‌ها بستگی دارد.(Kazem et al.،2015) . در مرحله طراحی، توجه به قرارگیری آرایه‌های خورشیدی در معرض حداکثر آفتاب و عدم قرارگیری در معرض سایه موانع همچون ساختمان‌ها و یا درختان اطراف از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. به ویژه در طول دوره اوج جذب تابش خورشیدی شامل سه ساعت ظهر خورشیدی (یک ساعت و نیم قبل و بعد از ظهر خورشیدی) بهتر است کاملاً خارج از سایه باشد (Strong،2016). جهت‌گیری آرایه‌های مختلف می‌تواند تأثیر قابل توجهی در تولید انرژی سالانه یک سیستم داشته باشد، آرایه‌های شیبدار، ۷۰٪ -۵۰٪ بیشتر از آرایه‌های نصب شده بر نمای عمودی برق تولید می‌کنند. سلول‌های خورشیدی را می‌توان جایگزین نمای سنتی ساختمان یا شیشه اسپندرال۱ نمود. اغلب نصب پنل‌ها به‌صورت عمودی بوده که دسترسی به منابع خورشیدی را

[1] Spandrel Glass

کاهش می‌دهد، اما وسعت سطح نمای عمودی ساختمان‌ها می‌تواند این کاهش قدرت را جبران نماید(Strong،2016). پنل‌های فتوولتاییک ممکن است بر روی سایبان‌ها و به شکل دندان‌اره-ای بر روی نمای ساختمان قرار گیرند. این باعث افزایش دسترسی به نور مستقیم خورشید و در عین حال مزایای معماری دیگری مانند سایه غیرفعال می‌شود. ادغامBIPV با اجزای سازنده ساختمان مانند سیستم سایبان‌ها می‌تواند هزینه‌ها و تأثیرات زیست‌محیطی را کاهش دهد(Perez et al., 2012). استفاده از سیستم‌های خورشیدی روی بام می‌تواند جایگزین مستقیم سقف‌های شیروانی فلزی و شینگل‌های آسفالتی شود. کاربرد سیستم‌های خورشیدی در آسمانخراش‌ها هم اقتصادی بوده و هم از اشکال طراحی مهیجی برخوردار می‌باشد(Strong,2016). پنجره BIPV ارائه شده توسط(2010) Chow et al یک فناوری نوآورانه شیشه‌ای برای استفاده در ساختمان‌های مدرن است. گزارش وی نشان می‌دهد، پنجره خورشیدی در مقایسه با شیشه‌های شفاف دوجداره و پنجره‌های شیشه‌ای کم‌مصرف، ۲۰۰٪ افزایش گرمای اتاق را کاهش می‌دهد. این درحالی است که عملکرد خروجی الکتریکی و بصری پنل‌های خورشیدی نیمه شفاف۱ که برای پنجره‌ها به کار می‌رود تحت تأثیر پارامترهایی چون جریان و ولتاژ، ضریب عبور نور، درصد کسب تابش خورشیدی برای هر دو ماژول تک و چندجداره و نسبت مساحت پنجره‌ها به دیوار قرار دارد.Joseoh et al)،(2019 . نحوه طراحی و آرایش ماژول‌ها در نمای ساختمان‌ها می‌تواند در افزایش بهره‌وری انرژی اثرگذار باشد. به‌عنوان مثال کاربرد نمای خورشیدی تطبیقی(ASF۲) به‌عنوان یک عنصر نمای هوشمند می‌تواند تأثیر بسزایی در بهره‌وری انرژی، توزیع نور روز و آرامش بصری داشته باشد(Nagy et al., 2016). ارزیابی دیگری توسط(2017) Jolissaint et al به منظور مقایسه تأثیر رنگ‌های مختلف بر عملکردBIPV انجام شده است. تفاوت کارآیی بین ماژول‌های سیاه و رنگی را می‌توان به این شرح اشاره کرد: سبز (۹۱٪)، آبی (۸۷٪)، خاکستری (۸۳٪) و طلایی (۸۳٪) ماژول‌های سیاه می-باشد.

۲-۵-جمع‌بندی عوامل تأثیرگذار بر بازدهی و عملکرد پنل‌های فتوولتاییک

نهایتا می‌توان عمده عوامل تأثیرگذار بر بازدهی و عملکرد پنل‌های فتوولتاییک به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم را بر اساس نتایج تحقیقات پیشین به شرح ذیل تعیین نمود:

۱-عوامل اقلیمی مانند دما، رطوبت، بارش، تابش خورشید، ابر و باد و گرد و غبار محیط ۲- جهت و شیب پنل‌های فتوولتاییک ۳-سایه‌اندازها شامل سایه‌اندازی خود پنل‌ها بر یکدیگر،

[1] Semitransparent BIPV
[2] Adaptive Solar Facade

ساختمان، همسایگی‌ها و موانع، سایه‌اندازی درختان، آسمان ابری و سایه‌اندازی آلودگی‌ها ۴-تهویه سیستم‌های فتوولتاییک ۵-شیوه‌های ترکیب سیستم‌های فتوولتاییک با ساختمان شامل ترکیب با بام، پنجره‌های سقفی و آتریوم‌ها، نما و عناصر آن، شیشه پنجره‌ها و سایبان‌ها یا لوورها ۶-تلفیق سیستم‌های فعال خورشیدی با سیستم‌های غیرفعال خورشیدی از جمله تلفیق پنل‌های فتوولتاییک با جدار شیشه‌ای بنا، متریال نما و سایبان‌ها ۷-جایگزینی فتوولتاییک‌ها با مصالح ساختمانی متداول ۸-نحوه آرایش پنل‌های فتوولتاییک ۹-شیب دیوار نمای ساختمان ۱۰-نوع کاربری ساختمان شامل میزان انرژی تولیدی مورد نیاز، مکان، زاویه و شیب پنل‌ها ۱۱-موقعیت نصب و قرارگیری بر روی جبهه‌های مختلف ساختمان ۱۲-جهت‌گیری ساختمان ۱۳-فصول مختلف سال ۱۴-ارتفاع نصب پنل‌ها ۱۵-سازه پنل‌ها ۱۶-ساختار و متریال پنل‌ها ۱۷-رنگ پنل‌ها ۱۸-شفافیت پنل‌ها

در این تحقیق از میان عوامل مؤثر بر بازدهی پنل‌های فتوولتاییک به بررسی تأثیر تلفیق سیستم‌های فعال خورشیدی با سیستم‌های غیرفعال خورشیدی شامل تلفیق پنل‌های فتوولتاییک با جداره‌های شیشه‌ای بنا، نمای ساختمان و سایبان‌ها بر میزان بهره‌وری انرژی می‌پردازد.

۳- روش تحقیق

به منظور بررسی و ارزیابی تأثیر تلفیق سیستم‌های فعال خورشیدی با سیستم‌های غیرفعال خورشیدی شامل تلفیق پنل‌های فتوولتاییک با جدارهای شیشه‌ای بنا، نمای ساختمان و سایبان‌ها، یک ساختمان با کاربری اداری واقع در منطقه یک شهر تهران دارای۷ طبقه روی همکف و دو طبقه زیرزمین به شرح جدول۱و به‌عنوان مبنای بررسی فاکتورها لحاظ شده است.

جدول۱: مشخصات ساختمان

نوع کاربری ساختمان	اداری
مکان ساختمان	تهران، نیاوران
مدت زمان استفاده از ساختمان	۸صبح تا ۴بعدازظهر- هر روز به جز پنجشنبه و جمعه
تعداد طبقات	طبقه همکف+ ۷طبقه روی همکف+ ۲طبقه پارکینگ

منبع: نگارنده

کلیه مصارف برق مصرفی ساختمان به شرح جدول۲ بررسی و میزان انرژی مصرفی مورد نیاز ساختمان محاسبه شده است. با توجه به میزان انرژی مصرفی مورد نیاز، نوع، ظرفیت و تعداد

پنل‌های فتوولتاییک مورد نیاز جهت تأمین برق مصرفی محاسبه شده است. از میان پنل‌های فتوولتاییک، پنل‌های پربازده ۴۰۰ وات به دلیل بازدهی بالای پنل‌ها در سه مدلBIPV، شفاف و نیمه شفاف باتوجه به موقعیت‌های مختلف نما به ترتیب شکل‌های ۱و۲و۳ انتخاب شده است. باتوجه به نوع کاربری ساختمان، میزان نور مفید در روز، تعداد پنل‌های فتوولتاییک مورد نیاز و مساحت هر پنل طبق روابط زیر محاسبه شده است.

(۱) **میزان نور مفید در روز:** ۴ ساعت

(۲) **متوسط میزان انرژی روزانه تولید شده توسط هر پنل:** وات ساعت در روز ۱۶۰۰ = ۴۰۰×۴

(۳) **تعداد پنل‌های فتوولتاییک مورد نیاز:** برق تولیدی روزانه توسط یک پنل / برق مصرفی روزانه ساختمان عدد ۳۰۲۹۶۷۴ ÷ ۱۶۰۰= ۱۸۹۴

(۴) **مساحت هر پنل فتوولتاییک:** مترمربع ۲/۰۲۴×۱/۰۲۴=۲/۰۷۲

با توجه به نتایج تحقیقات پیشین، بهترین جبهه جهت نصب پنل‌های فتوولتاییک در اقلیم مورد نظر نمای جنوب ساختمان می‌باشد (vafaei, 2012). لذا باتوجه به مساحت مفید نمای جنوب و مساحت جدار شیشه‌ای نمای جنوب

جهت نصب پنل‌های فتوولتاییک(حدود ۶۰ درصد نمای جنوب)، تعداد پنل‌های قابل نصب و میزان انرژی حاصل از این پنل‌ها طبق روابط زیر بررسی و محاسبه شده است.

جدول۲: انرژی مصرفی مورد نیاز ساختمان

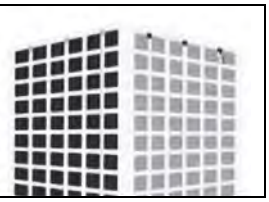
نوع وسیله برقی	تعداد	توان مصرفی(W)	ساعت مصرف(h)	میزان مصرف(Wh)
کامپیوتر با مانیتور LCD	۲۷۰	۲۵۰	۸	۵۴۰,۰۰۰
دستگاه ۴کاره پرینتر+فکس+کپی+اسکن	۸۱	۷۰۰	۰,۵	۲۸,۳۵۰
اسپلیت ۹۰۰۰	۲۰	۸۰۰	۵	۸۰,۰۰۰
اسپلیت ۱۲۰۰۰	۳۱	۱۲۰۰	۵	۱۸۶,۰۰۰
اسپلیت ۲۴۰۰۰	۱۵	۲۰۰۰	۵	۱۵۰,۰۰۰
چیلر تراکمی ۱۲۰ تن	۲	۲۰۰۰۰	۸	۳۲۰,۰۰۰
ویدئوپروژکتور	۱۵	۳۰۰	۱	۴,۵۰۰
پرده نمایش	۱۵	۲۵	۰,۰۸	۳۰
اگزاست فن مرکزی	۲	۱۵۰۰	۸	۲۴,۰۰۰
هواکش قوی	۴	۷۵۰	۸	۲۴,۰۰۰
هواکش ضعیف	۱	۵۵	۶	۳۳۰
یخچال ۱۶ فوت	۳	۳۵۰	۲۴	۲۵,۲۰۰
سردخانه	۱	۵۰۰۰	۲۴	۱۲۰,۰۰۰
مایکروفر	۳	۱۱۰۰	۱	۳,۳۰۰
فر برقی	۲	۲۷۰۰	۱	۵,۴۰۰

لامپ FPL60*60	۱۰۹۰	۳۶	۸	۳۱۳,۹۲۰
لامپ LED کم مصرف	۲۰۰	۱۰	۸	۱۶,۰۰۰
لامپ LED سقفی روکار	۴۰	۱۸	۸	۵,۷۶۰
دیتاسنتر	۱	۲۷۰۰۰	۲۴	۶۴۸,۰۰۰
سرور کوچک	۸	۱۲۰۰	۲۴	۲۳۰,۴۰۰
دوربین مداربسته	۴۰	۸	۲۴	۷,۶۸۰
آسانسور با ظرفیت ۱۳ نفر	۲	۱۲۵۰۰	۲	۵۰,۰۰۰
تلویزیون LCD۴۰	۳	۱۲۰	۲۴	۸,۶۴۰
تلویزیون LED50	۳	۱۴۰	۱	۴۲۰
سیستم اعلام حریق(کنترل پنل)	۱	۴,۱	۲۴	۹۸,۴
بوستر پمپ‌های آبرسانی	۲	۱۱۰۰	۸	۱۷,۶۰۰
بوستر پمپ‌های آتشنشانی	۲	۴۰۰۰	-	-
UPS	۴	۲۰۰۰	۸	۶۴,۰۰۰
دستگاه خودپرداز	۲	۸۰۰	۲۴	۳۸,۴۰۰
تلفن بیسیم	۱۴	۱۵۰	۲۴	۵۰,۴۰۰
تلفن	۲۷۰	۷	۲۴	۴۵,۳۶۰
مشعل	۲	۷۵۰	۸	۱۲,۰۰۰
سایر	۳۰۰۰	-	۳	۹,۰۰۰
جمع انرژی مصرفی روزانه بر حسب وات ساعت				۳,۰۲۹,۶۷۴
جمع انرژی مصرفی روزانه بر حسب کیلووات ساعت				۳۰۲۹/۶۷۴

منبع: نگارندگان

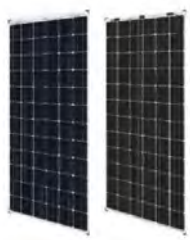
Model: High Efficiency BIPV Double Glass Solar Panel	
Material: Monocrystalline Silicon	
Max Power: 400W	
Number of cells: 72 cells	
Module efficiency: 20.43	
Operational Temperature: -40~+85℃	
Transparency: No transparency model	
Price: $0.23/ Watt	

شکل ۱: مشخصات فنی پنل‌های فتوولتاییک BIPV (منبع: www.bluesunpv.com)

Model: High transparent BIPV solar panel for building	
Material: Monocrystalline Silicon	
Max Power: 400W	
Number of cells: 72 cells	

Module efficiency: 17.41	
Operational Temperature: -40~+85℃	
Transparency: High Transmission Tempered Glass	
Price: $0.85/ Watt	

شکل ۲. مشخصات فنی پنل‌های فتوولتاییک شفاف(منبع: **www.bluesunpv.com**)

Model: High Efficiency Bipv Transparent Solar Panel	
Material: Monocrystalline Silicon	
Max Power: 400W	
Number of cells: 72 cells	
Module efficiency: 18.80	
Operational Temperature: -40~+85℃	
Transparency: Normal Transmission Tempered Glass	
Price: $0.25/ Watt	

شکل ۳. مشخصات فنی پنل‌های فتوولتاییک نیمه شفاف(منبع: **www.bluesunpv.com**)

(۵) **مساحت نمای جنوبی ساختمان:** ۱۳۰۳ مترمربع

مساحت جدار شیشه‌ای نمای جنوب: ۷۸۲ مترمربع

(۶) **تعداد پنل‌های فتوولتاییک قابل نصب بر روی سطوح مفید نمای جنوب و سطوح شیشه‌ای نما** = مساحت پنل÷ مساحت نمای جنوب عدد ۷۸۲÷۲/۰۷۲=۳۷۷

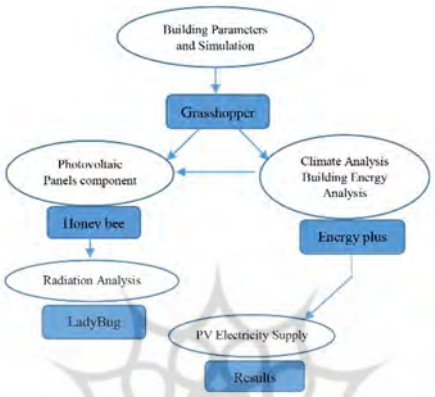
(۷) **نسبت انرژی تأمین شده توسط پنل‌های فتوولتاییک نصب شده بر روی نمای جنوب به کل انرژی مورد نیاز ساختمان**= تعداد پنل‌های مورد نیاز÷ تعداد پنل قابل نصب بر روی نمای جنوب درصد ۳۷۷÷۱۸۹۴ ≈ ۲۰

میزان انرژی تأمین شده توسط پنل‌های فتوولتاییک نصب شده بر روی نمای جنوب= متوسط میزان انرژی روزانه تولید شده توسط هر پنل × تعداد پنل قابل نصب بر روی نمای جنوب

وات ساعت در روز ۳۷۷×۱۶۰۰ = ۶۰۳۲۰۰

نتایج نشان می‌دهند میزان انرژی حاصل از پنل‌های فتوولتاییک نصب شده بر روی سطوح مفید نمای جنوب۲۰٪ میزان انرژی مصرفی مورد نیاز ساختمان می‌باشد. لذا در صورت نصب پنل‌های فتوولتاییک مذکور صرفاً بر روی سطوح مفید نمای اصلی ساختمان (نمای جنوبی) می‌توان تا ۲۰ درصد نیازهای برق مصرفی ساختمان را تأمین نمود. در ادامه ساختمان مذکور در

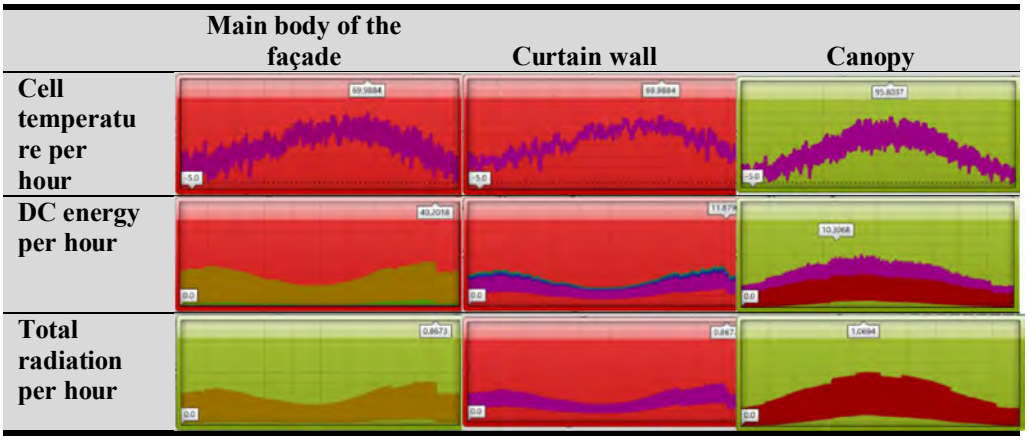
نرم‌افزار گرس هاپر شبیه‌سازی شده و جهت ورود اطلاعات اقلیمی و مکانی از نرم‌افزار انرژی‌پلاس و از پلاگین‌های هانی‌بی و لیدی‌باگ در ساخت کامپوننت‌های فتوولتاییک استفاده شده و دریافت خروجی و مقدار تولید انرژی‌های حاصل از پنل‌های مورد نظر با مساحت یکسان در سه حالت تلفیق با ۱-بدنه اصلی نما ۲-سایبان‌ها ۳-جدار شیشه‌ای به‌صورت جداگانه بررسی و میزان تولید انرژی در هریک محاسبه شده است. شکل شماره۴ روش بررسی تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل ۴: روش بررسی تحقیق(منبع: نگارندگان)

۴- نتایج و بحث

مساحت کل پنل‌های فتوولتاییک استفاده شده در هر سه حالت برابر با مساحت مفید نمای جنوب جهت نصب پنل‌ها و یا سطح جدار شیشه‌ای نمای جنوب معادل ۷۸۲ مترمربع می‌باشد. به‌منظور بررسی تأثیر جانمایی پنل‌ها در نما بر میزان تولید انرژی، ابتدا از پنل‌های با مشخصات و مساحت یکسان در موقعیت‌های مختلف به شرح شکل‌های۵و۷و۹ برای هرسه جزء استفاده و میزان تولید متوسط انرژی به شرح جدول۳ و شکل۵ بررسی شده است.



شکل۵. مقایسه دمای سلول، انرژی جریان مستقیم و تابش کل در هر ساعت(منبع: نگارندگان)

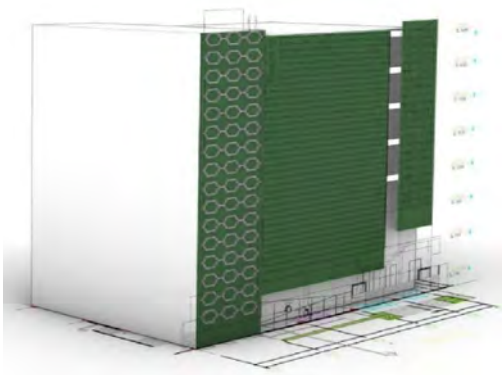
اختلاف میزان انرژی تولید شده توسط پنل‌ها نشان می‌دهد جانمایی پنل‌ها در موقعیت‌های مختلف نما تأثیر بسزایی در میزان بهره‌وری انرژی پنل‌ها دارد.

جدول۳. بررسی تأثیر جانمایی پنل‌ها در نما بر میزان تولید انرژی

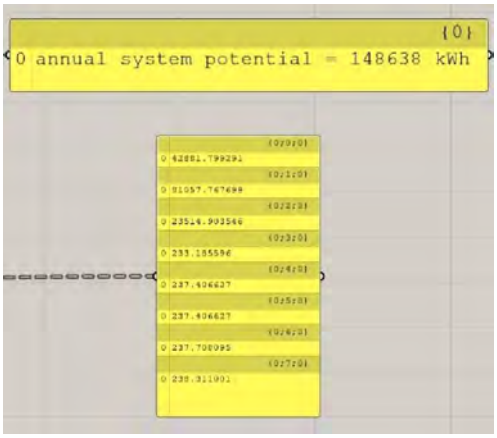
موقعیت نصب پنل	نوع پنل	میزان متوسط تولید سالیانه انرژی (کیلووات ساعت)	درصد بهره‌وری انرژی	نوع امتیاز
بدنه اصلی نما	High Efficiency BIPV Solar Panel	۱۴۸۶۳۸	۳۱	مثبت
جدار شیشه‌ای	High Efficiency BIPV Solar Panel	۱۴۹۱۰۶	۳۲	مثبت
سایبان	High Efficiency BIPV Solar Panel	۱۷۴۲۰۴	۳۷	مثبت

منبع: نگارندگان

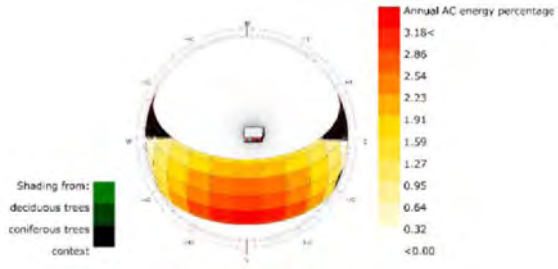
سپس نوع پنل‌های فتوولتاییک استفاده شده برحسب موقعیت نصب در نما انتخاب و با مساحت یکسان جایگزین شده است. در حالت اول، پنل‌های فتوولتاییک مطابق با شکل۶ با نمای ساختمان تلفیق شده است، درصد انرژی جریان متناوب سالانه برحسب مسیر تابش خورشید به شرح شکل۷ و میزان متوسط سالیانه تولید انرژی ۱۴۸۶۳۸ کیلووات ساعت مطابق با شکل۸ می‌باشد.



شکل۶. پنل‌های فتوولتاییک در تلفیق با نمای ساختمان
(منبع: نگارندگان)

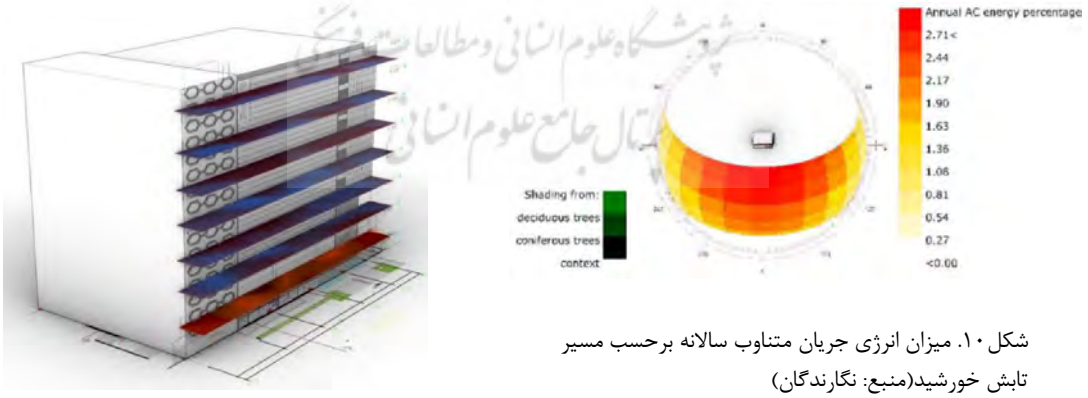


شکل۸. میزان متوسط تولید سالیانه انرژی توسط پنل‌های در تلفیق با نما(منبع: نگارندگان)



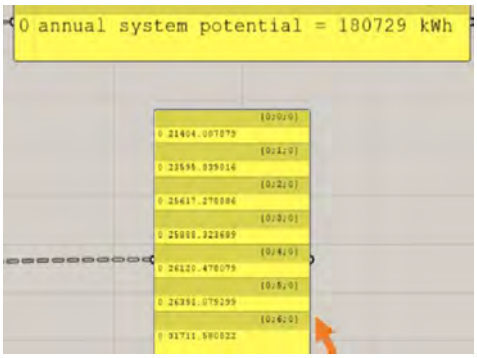
شکل۷. میزان انرژی جریان متناوب سالانه برحسب مسیر تابش خورشید(منبع: نگارندگان)

در حالت دوم که پنل‌های فتوولتاییک مانند شکل۹ با سایبان‌ها (به‌صورت عمود بر نما) تلفیق شده است، درصد انرژی جریان متناوب سالانه برحسب مسیر تابش خورشید به شرح شکل۱۰ و میزان متوسط سالیانه تولید انرژی ۱۸۰۷۲۹کیلووات ساعت مطابق با شکل۱۱ می‌باشد.



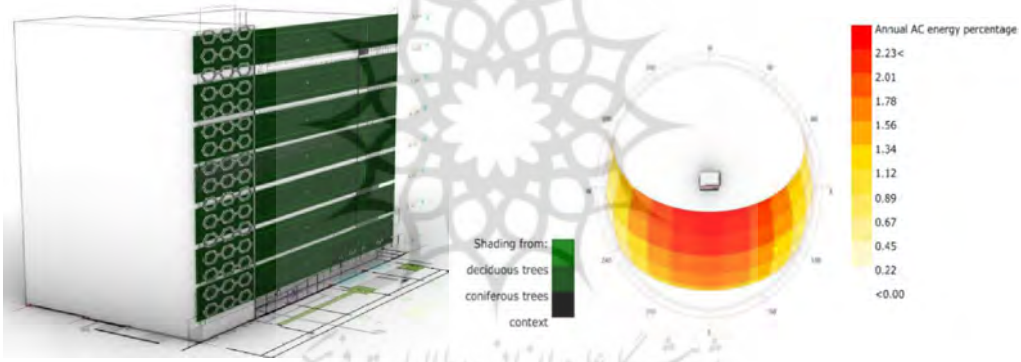
شکل۱۰. میزان انرژی جریان متناوب سالانه برحسب مسیر تابش خورشید(منبع: نگارندگان)

شکل۹. پنل‌های فتولتاییک در تلفیق با سایبان (منبع: نگارندگان)



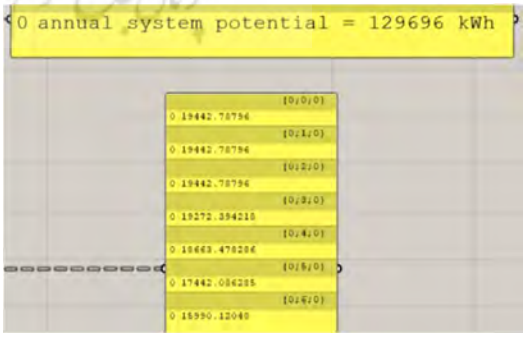
شکل۱۱. میزان متوسط تولید سالیانه انرژی توسط پنل‌های در تلفیق با سایبان (منبع: نگارندگان)

در حالت سوم که پنل‌های فتوولتاییک با جدار شیشه‌ای ساختمان مطابق شکل ۱۲ تلفیق شده است، درصد انرژی جریان متناوب سالانه برحسب مسیر تابش خورشید به شرح شکل۱۳ و میزان متوسط سالیانه تولید انرژی ۱۲۹۶۹۶ کیلووات ساعت مطابق شکل ۱۴ می‌باشد.



شکل۱۳. میزان انرژی جریان متناوب سالانه برحسب مسیر تابش خورشید

شکل۱۲. پنل‌های فتوولتاییک در تلفیق با جدار شیشه‌ای (منبع: نگارندگان)



شکل ۱۴. میزان متوسط تولید سالیانه انرژی توسط پنل‌های در تلفیق با جدار شیشه‌ای(منبع: نگارندگان)

بررسی و مقایسه میزان متوسط سالیانه تولید انرژی حاصل از تلفیق انواع پنل‌های BIPV با هریک از اجزای اصلی نما با مساحت یکسان مطابق جدول ۷ نشان می‌دهد بیشترین تولید انرژی مربوط به سایبان با میزان متوسط سالیانه ۱۸۰۷۲۹ کیلووات ساعت و در وهله دوم مربوط به بدنه اصلی نما به میزان متوسط سالیانه ۱۴۸۶۳۸کیلووات ساعت و نهایتاً مربوط به جدار شیشه‌ای با میزان متوسط سالیانه ۱۲۹۶۹۶ کیلووات ساعت می‌باشد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد زاویه و جهت‌گیری پنل‌ها نسبت به سایر عوامل بیشترین تأثیر را در میزان بهره‌وری و تولید انرژی پنل‌ها دارد لذا سایبان‌ها که به‌صورت افقی و عمود بر دیوارهای نمای ساختمان نصب شده‌اند بهره‌وری بیشتری نسبت به نمای عمودی و جدار شیشه‌ای نما داشته و به دلیل حفظ فاصله مناسب مابین سایبان‌ها از ایجاد سایه بر روی یکدیگر جلوگیری نموده است. همچنین نوع پنل‌های به‌کار رفته در بدنه اصلی نما به دلیل داشتن بازده انرژی بالای ماژول‌ها نسبت به پنل‌های به‌کار رفته در جدار شیشه‌ای از بهره‌وری انرژی بالاتری برخوردار می‌باشد. از دیگر عوامل مؤثر بر انتخاب موقعیت نصب پنل‌ها بر روی نما می‌توان به جانمایی، نوع، بازدهی، ضریب عبور نور، شفافیت و تنوع طرح پنل‌ها، پوشش برف و باران بر روی پنل‌ها، میزان هزینه و موجودی در بازار هر یک از پنل‌ها اشاره کرد. نوع پنل‌ها براساس جنس، ماکزیمم قدرت، بازده ماژول، نحوه نصب، تعداد سلول‌ها، درصد مساحت فعال ماژول‌ها، شفافیت، دمای پنل‌ها به‌هنگام کارکرد انتخاب می‌شود. دو عامل اصلی در تفاوت مدل این پنل‌ها میزان شفافیت(ضریب عبور نور) و بازده ماژول می‌باشد به‌همین خاطر غالباً از پنل‌های شفاف با قابلیت بالای عبور نور جهت جدارهای شیشه‌ای و نیمه شفاف با قابلیت نسبی عبور نور برای سایبان‌ها استفاده می‌شود. هرچه میزان شفافیت و ضریب عبور نور این پنل‌ها بیشتر باشد میزان بازدهی انرژی آن کمتر می‌شود. همچنین تأثیر میزان شفافیت با وضوح رویت تصویر نیز رابطه مستقیم دارد. هزینه تأمین این پنل‌ها متفاوت بوده و میزان شفافیت پنل‌ها با هزینه آن رابطه مستقیم داشته لذا پنل‌های به‌کار رفته در جدارهای شیشه‌ای از هزینه بالاتری برخوردار می‌باشد. همچنین قیمت‌های ذکر شده مربوط به پنل‌های غیرقابل انعطاف بوده و قیمت پنل‌های منعطف ۲ الی ۳ برابر پنل‌های معمولی می‌باشد. امکان جایگزینی پنل‌هایBIPV با مصالح ساختمان می‌تواند در جبران هزینه‌های تأمین آن نقش مؤثری ایفا نماید. جدول۴، تأثیر نوع و موقعیت نصب پنل‌ها را بر میزان بهره‌وری انرژی نشان می‌دهد. باتوجه به جدول۴ بیشترین میزان تولید انرژی به ترتیب مربوط به ۱-پنل‌های قابل نصب در سایبان‌ها از نوع پنل‌های خورشیدی ترکیبی شفاف با بازدهی بالا ۲-پنل‌های به‌کاررفته بر روی بدنه اصلی نما و از نوع پنل‌های خورشیدی ترکیبی با بازدهی بالا و ۳-پنل‌های قابل نصب در جدارهای شیشه‌ای و از نوع پنل‌های خورشیدی ترکیبی با شفافیت بالا

می‌باشد. از دیگر عوامل مؤثر و حائز اهمیت برای طراحان جهت انتخاب موقعیت نصب پنل‌ها، وضوح رویت تصاویر و میزان عبور نور از پنل‌ها به فضاهای داخلی می‌باشد. جدول۵ میزان بازدهی انرژی پنل‌ها و جدول۶ هزینه تأمین پنل‌ها را بر حسب نوع و موقعیت نصب پنل‌ها نشان می‌دهد.

جدول۴. مقایسه میزان متوسط تولید سالیانه انرژی پنل‌ها برحسب نوع و موقعیت نصب پنل‌ها بر روی نما

موقعیت نصب پنل	نوع پنل	میزان متوسط تولید سالیانه انرژی (کیلووات ساعت)	درصد بهره‌وری انرژی	نوع امتیاز
بدنه اصلی نما	High Efficiency BIPV Solar Panel	۱۴۸۶۳۸	۳۲	مثبت
جدار شیشه‌ای	High transparent BIPV solar panel	۱۲۹۶۹۶	۲۸	مثبت
سایبان	High Efficiency Bipv Transparent Solar Panels	۱۸۰۷۲۹	۴۰	مثبت

منبع: نگارندگان

جدول۵. مقایسه میزان بازدهی انرژی پنل‌ها برحسب موقعیت نصب پنل‌ها بر روی نما

موقعیت نصب پنل	نوع پنل	درصد بازدهی انرژی	درصد نسبی	نوع امتیاز
بدنه اصلی نما	High Efficiency BIPV Solar Panel	۲۰/۴۳	۳۶	مثبت
جدار شیشه‌ای	High transparent BIPV solar panel	۱۷/۴۱	۳۱	مثبت
سایبان	High Efficiency Bipv Transparent Solar Panel	۱۸/۸۰	۳۳	مثبت

منبع: نگارندگان

جدول۶. مقایسه هزینه تأمین پنل‌ها برحسب موقعیت نصب پنل‌ها بر روی نما

موقعیت نصب پنل	نوع پنل	هزینه تأمین پنل ۴۰۰ وات(دلار)	درصد هزینه	نوع امتیاز	درصد نسبی با معادل‌سازی نوع امتیاز
بدنه اصلی نما	High Efficiency BIPV Solar Panel	۹۲	۱۷	منفی	۸۳
جدار شیشه‌ای	High transparent BIPV solar panel	۳۴۰	۶۴	منفی	۳۶
سایبان	High Efficiency Bipv Transparent Solar Panel	۱۰۰	۱۹	منفی	۸۱

منبع: نگارندگان

این مسأله به‌خصوص برای ساکنین فضاهای داخلی ساختمان از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. اگرچه درحال حاضر میزان عبور نور و وضوح دید از سطح این پنل‌ها حتی در پنل‌های شفاف، رضایت مصرف‌کنندگان را تأمین نمی‌کند اما طراحان و تولیدکنندگان را برآن داشته که نسبت به رفع مشکلات و ارتقاء سیستم‌های موجود اقدام نمایند. جداول ۷ و ۸ مبین تأثیر این دو عامل بر موقعیت نصب پنل‌ها در اجزای نمای ساختمان می‌باشد. ضریب عبور نور، وضوح رویت تصاویر و هزینه از جمله مسائلی هستند که نسبت متقاضیان پنل‌های شفاف و نیمه شفاف را به سایر پنل‌های موجود در بازار کاهش می‌دهد. همین امر موجب عرضه کمتر این‌گونه پنل‌ها در بازارهای مصرفی شده است، لذا مطابق جدول ۹ از محدودیت موجودی بازار بیشتری نسبت به سایر پنل‌ها برخوردار می‌باشد. به‌طورکلی پنل‌های BIPV از تنوع طرح و انعطاف‌پذیری بالایی در طراحی برخوردار نبوده و طراحان را با محدودیت‌های زیادی در طراحی نمای ساختمان‌ها مواجه می‌سازند اما اهمیت ضرورت استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی، تولیدکنندگان را در صدد افزایش تنوع در طرح و رنگ و سایر ویژگی‌های آن برافراشته که تاکنون بیشتر متوجه پنل‌های فتوولتاییک قابل نصب بر روی نما طبق جدول شماره ۱۰ می‌باشد.

جدول۷. مقایسه میزان وضوح رویت تصاویر از پنل‌ها برحسب موقعیت نصب پنل‌ها بر روی نما

موقعیت نصب پنل	نوع پنل	درصد وضوح رویت	نوع امتیاز	درصد نسبی با معادل‌سازی نوع امتیاز
بدنه اصلی نما	High Efficiency BIPV Solar Panel	۰	منفی	۵۵
جدار شیشه‌ای	High transparent BIPV solar panel	۵۰	مثبت	۲۸
سایبان	High Efficiency Bipv Transparent Solar Panel	۳۰	مثبت	۱۷

منبع: نگارندگان

جدول۸. مقایسه میزان عبور نور برحسب موقعیت نصب پنل‌ها بر روی نما

موقعیت نصب پنل	نوع پنل	درصد عبور نور	نوع امتیاز	درصد نسبی با معادل‌سازی نوع امتیاز
بدنه اصلی نما	High Efficiency BIPV Solar Panel	۰	منفی	۴۵
جدار شیشه‌ای	High transparent BIPV solar panel	۷۰	مثبت	۳۲
سایبان	High Efficiency Bipv Transparent Solar Panel	۵۰	منفی	۲۳

منبع: نگارندگان

جدول۹. مقایسه میزان محدودیت بازار برحسب موقعیت نصب پنل‌ها بر روی نما

موقعیت نصب پنل	نوع پنل	درصد محدودیت موجودی بازار	نوع امتیاز	درصد نسبی با معادل‌سازی نوع امتیاز
بدنه اصلی نما	High Efficiency BIPV Solar Panel	۰	منفی	۵۵
جدار شیشه‌ای	High transparent BIPV solar panel	۵۰	منفی	۲۸
سایبان	High Efficiency Bipv Transparent Solar Panel	۷۰	منفی	۱۷

منبع: نگارندگان

بارش برف و باران از عوامل اقلیمی مؤثر بر میزان بازدهی پنل‌ها برحسب موقعیت نصب آن می‌باشد، نتایج حاصل از جدول ۱۱ نشان می‌دهد میزان بهره‌وری انرژی پنل‌ها در سایبان‌ها به‌هنگام ریزش برف و باران به دلیل پوشش سطوح آن کمتر از پنل‌های نصب شده در سایر قسمت‌های نما می‌باشد.

جدول۱۰. مقایسه میزان تنوع طرح برحسب موقعیت نصب پنل‌ها بر روی نما

موقعیت نصب پنل	نوع پنل	درصد تنوع طرح	نوع امتیاز
بدنه اصلی نما	High Efficiency BIPV Solar Panel	۶۰	مثبت
جدار شیشه‌ای	High transparent BIPV solar panel	۱۰	مثبت
سایبان	High Efficiency Bipv Transparent Solar Panel	۳۰	مثبت

منبع: نگارندگان

بدین‌ترتیب نتایج وزن‌دهی و رتبه‌بندی شاخص‌ها مطابق جدول ۱۲ نشان می‌دهد، سایبان با وزن ترکیبی ۰,۷۱۵، بدنه اصلی نما با وزن ۰,۱۴۴ و جدار شیشه‌ای با وزن ۰,۱۴۱ به‌ترتیب بیشترین میزان بهره‌وری انرژی و کارآیی را در انتخاب موقعیت نصب پنل‌ها در اجزای نما خواهند داشت.

جدول۱۱. مقایسه میزان بهره‌وری انرژی پنل‌ها باتوجه به بارش برف و باران برحسب موقعیت نصب پنل‌ها بر روی نما

موقعیت نصب پنل	نوع پنل	میزان متوسط تولید سالیانه انرژی باتوجه به بارش برف و باران (کیلووات ساعت)	درصد بهره‌وری انرژی	نوع امتیاز
بدنه اصلی نما	High Efficiency BIPV Solar Panel	۶۳۹۰۷	۳۳	مثبت
جدار شیشه‌ای	High transparent BIPV solar panel	۴۸۸۵۶	۲۵	مثبت
سایبان	High Efficiency Bipv Transparent Solar Panel	۸۳۵۲۲	۴۲	مثبت

منبع: نگارندگان

جدول۱۲. وزن‌دهی و رتبه‌بندی شاخص‌ها

عوامل مؤثر	بدنه اصلی نما (درصد)	جدار شیشه‌ای (درصد)	سایبان (درصد)
نوع پنل‌ها	۳۲	۲۸	۴۰
بازده انرژی ماژول	۳۶	۳۱	۳۳
هزینه تأمین پنل	۸۳	۳۶	۸۱
وضوح رویت تصاویر از داخل پنل	۵۵	۲۸	۱۷
ضریب انتقال نور پنل	۴۵	۳۲	۲۳
محدودیت موجودی بازار	۵۵	۲۸	۱۷
تنوع طرح پنل‌ها	۶۰	۱۰	۳۰
پوشش پنل‌ها با برف و باران	۳۳	۲۵	۴۲
جانمایی پنل‌ها(وزن تصمیم‌گیرنده)	۳۱	۳۲	۳۷
وزن هر شاخص	۰,۲۲۳۱	۰/۱۸۹۹	۰/۵۸۶۹
وزن ترکیبی هر شاخص	۰/۱۹۹۲	۰/۱۷۵۰	۰/۶۲۵۶
رتبه هر شاخص براساس وزن شاخص	۲	۳	۱

منبع: نگارندگان

این نتایج می‌تواند کمک مؤثری برای طراحان و مهندسان انرژی در جهت استفاده هرچه بهینه‌تر از پنل‌های فتوولتاییک و افزایش میزان بهره‌وری و کارایی آن در ساختمان باشد. همچنین با توجه به محدودیت‌های موجود در طرح و سطح فضای مفید مورد نیاز جهت نصب

پنل‌ها بر روی نما، تعیین مناسب‌ترین موقعیت نصب، تأثیر بسزایی در افزایش بهره‌وری پنل‌ها و رضایت مصرف‌کنندگان خواهد داشت. ضمن اینکه می‌توان با انتخاب مناسب موقعیت نصب پنل‌ها بر روی نما در تعداد استفاده از پنل‌ها و هزینه‌های حاصل از آن صرفه‌جویی نمود.

۵- نتیجه‌گیری

یکی از مهم‌ترین موضوعات در زمینه استفاده از پنل‌هایBIPV، افزایش بهره‌وری انرژی حاصل از این پنل‌ها می‌باشد. افزایش بهره‌وری علاوه بر ساختار و کارکرد پنل‌ها شامل طراحی مؤثر نمای ساختمان‌ها به‌وسیله آن نیز می‌شود. در این تحقیق ضمن بررسی عوامل مؤثر بر افزایش بازدهی پنل‌هایBIPV، امکان نصب پنل‌ها در اجزای مختلف نما بررسی و میزان تولید و بهره‌وری انرژی الکتریکی در هریک از اجزا مشخص شده است. همچنین سایر عوامل تأثیرگذار بر موقعیت نصب پنل‌ها و میزان اثرگذاری آن شامل جانمایی پنل‌ها، نوع پنل‌ها، بازده انرژی ماژول، هزینه تأمین پنل‌ها، شفافیت پنل‌ها، ضریب عبور نور پنل‌ها، محدودیت موجودی در بازار، تنوع طرح پنل‌ها و پوشش برف و باران بر روی پنل بررسی و تعیین شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد، در طراحی نمای ساختمان‌ها، بیشترین میزان تولید انرژی و بالاترین بهره‌وری انرژی و کارایی با استفاده از پنل‌هایBIPV به ترتیب در تلفیق پنل‌های مذکور با ۱-سایبان ۲- بدنه اصلی نما و ۳- جدار شیشه‌ای می‌باشد. نتایج این تحقیق می‌تواند کمک مؤثری به طراحان ساختمان اعم از مهندسین معمار و انرژی جهت استفاده از پنل‌ها در طراحی نمای ساختمان‌ها به گونه‌ای باشد که بیشترین بهره‌وری و تولید انرژی را با انتخاب نوع پنل و جانمایی مناسب پنل‌ها بر روی نمای ساختمان داشته باشد.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

منابع و مآخذ:

۱- جعفری،ب.۱۳۹۴. بررسی سیستم‌های فتوولتائیک در معماری نوین. همایش ملی عمران و معماری با رویکردی بر توسعه پایدار. مرداد ماه.

۲- وفائی،ر. ۱۳۹۵. امکان‌سنجی استفاده از سیستم‌های یکپارچه با فتوولتائیک(مطالعه موردی شهر تهران). پایان‌نامه دکتری، دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه شهید بهشتی.۱۶۹ صفحه.

۳- وفائی،ر.۱۳۹۱. طراحی ساختمان‌های یکپارچه با فتوولتاییک در شهر تهران. نشریه صفه، دانشگاه شهید بهشتی، شماره ۵۶. ۷۴-۵۷.

۴- قیابکلو،ز.۱۳۹۸. مبانی فیزیک ساختمان. جهاد دانشگاهی دانشگاه صنعتی امیرکبیر.۳۷۲ صفحه.

۵- اکبری،ح.،هادوی،ف.،زمانی،م.،علیپور،ی.۱۳۹۵.تعیین جهت‌های مناسب استقرار ساختمان به منظور دریافت بهینه تابش خورشیدی در شهر زنجان. فصلنامه آمایش محیط، ش۳۳: ۱۷۳-۱۵۵.

۶- نصراللهی،ف.۱۳۹۰. ضوابط معماری و شهرسازی کاهش‌دهنده مصرف انرژی ساختمان‌ها. نشست کمیته ملی انرژی ایران. اسفند ماه.

۷- یوسفی،ح.،رومی،س.، نوراللهی،ی.۱۳۹۵.امکان‌سنجی اقتصادی و زیست‌محیطی استفاده از انرژی خورشیدی در تأمین آبگرم مصرفی ساختمان‌های مسکونی. فصلنامه آمایش محیط،ش۴۱: ۲۰۶-۱۸۵.

۸- وفائی، راحیل.۱۳۸۸. بررسی شیوه‌های طراحی سیستم‌های فتوولتائیک یکپارچه با ساختمان. نشریه صفه، پاییز و زمستان ۱۳۸۸، دوره ۱۹، شماره ۴۹. ۷۰-۶۹.

9- Wolter، N.2003. Options for Integrating PV into Your Building.

10- Osama Ghoneim، Ahmed.2018.Effect of external factors on deterioration of Photovoltaic panel's performance، thesis of SCHOOL OF SCIENCES AND ENGINEERING، THE AMERICAN UNIVERSITY IN CAIRO.

11- Gallo،P.،Romano،R. 2017.Adaptive facades ، developed with innovative nanomaterials ، for a sustainable architecture in the Mediterranean area، Procedia Engineering NO 180.

12- Nagy،Z.،Svetozarevic،B.،Jayathissa،P.،Begle،M.،Hofer،J.،Lydon،G. 2016.The Adaptive Solar Facade : From concept to prototypes، Frontiers of Architectural Research.

13- Singh،G.K.2013.Solar power generation by PV technology: A review. Energy،53:1-13.
14- Jordan،D.،Kurtz،S.2013. Photovoltaic degradation rates-an analytical review.Progress in photovoltaics: Research and Applications، 21(1):12-29.
15- Safdarian،F.،Nazari،M.E.2015.Optimal tilt angle and orientation for solar collectors in Iran. 2015. IEEE 10th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines، Power Electronics and Drives (SDEMPED)،September.
16- Skeiker،K.2009.Optimum tilt angle and orientation for solar collectors in Syria،Energy Conversion and Management،vol. 50، pp. 2439-2448.
17- Yunyun،W.،Shanming،K.،Fengshou،L.،Junfei،L.،Gang،P.2017. Performance of a building integrated photovoltaic،Energy and Buildings،Volume134،Pages71-79، January.
18- Kazem،H.،Chaichan،M.T.2015.Effect of Shadow on the Performance of Solar Photovoltaic،Mediterranean Green Buildings & Renewable Energy، Italy،August: 26-28.
19- Strong،S.2016.Building Integrated Photovoltaics،Solar Design Associates.
20- A.Kalogirou،S.2013،Photovoltaic Systems، Solar Energy Engineering.
21- Global Renewables Status Report.2017.Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21)
22- World Energy Outlook 2014(IEA). http://www.iea.org.
23- Barkaszi،S.F.،Dunlop،J.P.2001.Discussion of strategies for mounting photovoltaic arrays on rooftops، Solar Energy: The Power to Choose، Washington، D.C.،April: 21–26.
24- Crawford، R.H.،Treloar،G.J.،Fuller،R.J.،Bazilian ،M.2006.Life-cycle energy analysis of building integrated photovoltaic systems with heat recovery unit، Renewable and Sustainable Energy Reviews10:559–575.
25- Gallo،P.2014.Sustainable habitat:market trends and testing of innovation products،30th INTERNATIONAL PLEA CONFERENCE،16-18December ،CEPT University.
26- Papadopoulou،E.2012.Green Energy and Technology, Energy Management in Buildings Using Photovoltaics.
27- Chow،T.T.،Chunying،L.،Zhang،L.2010.Innovative solar windows for cooling-demand climate،Solar Energy Materials and Solar Cells.

28- Benedicto، J. ،Tatiana، P. ،Baraka، K.2019.Semitransparent Building Integrated Photovoltaic، International Journal of Photoenergy.
29- Bluesunpv.2019.www.bluesunpv.com.products catalogue.
30- Soteris، A.2009. Kalogirou، Photovoltaic Systems، Solar Energy Engineering.
31- Jolissaint، N. ،Hanbali، R.Hadorn، J. ،Schuler، Andreas.2017.Integration of Renewable Energy in the Built Environment، International Conference Future Buildings & Districts، Switzerland.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی